

УДК 621.382

АЛГОРИТМИ МУЛЬТИТАКТНОГО СИГНАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ В ХОЛЛІВСЬКИХ СЕНСОРНИХ ПРИСТРОЯХ

З. Ю. ГотраДоктор технічних наук, професор, завідувач кафедри
E-mail: zhotra@polynet.lviv.ua**Р. Л. Голяка**Доктор технічних наук, професор, професор кафедри
E-mail: holyaka@yahoo.com**В. Ю. Ільканич**

Аспірант*

*Кафедра електронних приладів**

E-mail: ilkanych.vika@gmail.com

Т. А. Марусенкова

Асистент

E-mail: tetyana.marus@gmail.com

Кафедра програмної інженерії**

**Національний університет «Львівська політехніка»
м. Львів, вул. С. Бандери, 12, Україна, 79013**В. В. Лесінський**

Асистент, кандидат технічних наук

Кафедра радіотехніки та інформаційної безпеки***

E-mail: lesynsky@mail.ru

І. М. Гординюк

Головний інженер***

E-mail: wanhod@i.ua

***Чернівецький національний університет ім. Юрія Федьковича
вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, Україна, 58012

Розглянуто вплив електромагнітної завади на відтвореність вимірювання сигналу в холлівських сенсорних пристроях. Компенсація електромагнітної завади забезпечується алгоритмом двотактного та тритактного сигнального перетворення при протилежних напрямках струму в імпульсах живлення холлівських сенсорів. Встановлена залежність ефективності мультитактного перетворення від режимів вимірювання

Ключові слова: холлівські сенсори, сигнальні перетворювачі, завадостійкість

Рассмотрено влияние электромагнитных помех на воспроизводимость измерений сигнала в холловских сенсорных устройствах. Компенсация электромагнитной помехи обеспечивается алгоритмом двухтактного и тритактного сигнального преобразования при противоположных направлениях тока импульсов питания холловских сенсоров. Исследована зависимость эффективности мультитактного преобразования от режимов измерений

Ключевые слова: сенсоры Холла, сигнальные преобразователи, помехоустойчивость

1. Вступ

Однією з ключових характеристик сучасних електронних пристроїв є електромагнітна сумісність. Електромагнітні завади, особливо обумовлених паразитним впливом силових ліній енергоживлення, стають причиною погіршення точності вимірювання більшості сенсорних пристроїв. Значна увага до придушення електромагнітних завад приділяється в пристроях вимірювання біопотенціалів [1, 2], ємнісних сенсорах [3, 4], сенсорах вимірювання магнітного поля [5, 6] тощо.

В даній роботі досліджується ефективність придушення електромагнітних завад, а відтак, підвищення співвідношення сигнал-шум в пристроях вимірювання магнітного поля на основі холлівських сенсорів. Актуальність такої задачі, зокрема, має місце в сенсорних мережах з автономними малопотужними джерелами живлення [7, 8], пристроях картографування магнітного поля прискорювачів заряджених частинок та маг-

нітної діагностики реакторів термоядерного синтезу [9 – 11].

2. Постановка та аналіз задачі

Відомим способом придушення електромагнітної завади, а відтак підвищення співвідношення сигнал-шум в імпульсних пристроях вимірювання магнітного поля, є двотактне вимірювання сигналу при протилежних напрямках імпульсів струму живлення холлівських сенсорів.

Зміна знаку (напряму) струму обумовлює відповідну зміну знаку (полярності) вихідної напруги холлівського сенсора. Натомість, електромагнітна завада не залежить від струму живлення холлівського сенсора. Таким чином можна записати:

$$V_{I+} = V_H + V_{EM}, \quad V_{I-} = -V_H + V_{EM}, \quad (1)$$

де V_{I+} , V_{I-} – вихідні напруги при протилежних напрямках струму живлення; V_H , V_{EM} – холлівська (корисна) та електромагнітна (паразитна) складові сигналу. Результатом двотактного вимірювання є половина різниці значення сигналів в двох тактах:

$$V_{COR} = (V_{I+} - V_{I-}) / 2, \quad (2)$$

яке при певних ідеальних умовах (в першому наближенні) рівне корисній холлівській складовій сигналу та не залежить від паразитної електромагнітної складової:

$$V_{COR} = (V_H + V_{EM} + V_H - V_{EM}) / 2 = V_H. \quad (3)$$

Для виконання цих умов та ефективного придушення електромагнітної завади необхідно щоб частота перемикавання струму живлення була суттєво вищою за частоту завади. В двотактному вимірюванні ця частота перемикавання визначається часовою затримкою між двома суміжними вимірюваннями dt . На практиці часто використовують дещо інший алгоритм – при перемиканні напрямку струму холлівського сенсора одночасно перемикають і полярність вихідної напруги сигнального перетворювача. Здебільшого це здійснюють схемою, що реалізує принцип синхронного детектування, зокрема, періодично перемикаючи режим роботи підсилювача з неінверсного в інверсний. При такому алгоритмі полярність корисної складової сигналу в суміжних тактах залишається незмінною, а полярність електромагнітної завади змінюється на протилежну. Відповідно результатом двотактного вимірювання є сума сигналів двох суміжних тактів:

$$V_{COR} = (V_{I+}(t + dt) + (-V_{I-}(t))) / 2. \quad (4)$$

Запишемо часову залежність паразитної електромагнітної складової $V_{EM}(t)$ у виді рівняння гармонічного коливання амплітудою V_{EM0} та частотою f .

Тоді різниця сигналів між двома суміжними вимірюваннями визначається виразами:

$$V_{EM1} = V_{EM}(t) = V_{EM0} \sin(2\pi ft);$$

$$V_{EM2} = V_{EM}(t + dt) = V_{EM0} \sin(2\pi f(t + dt)); \quad (5)$$

$$V_{COR} = V_H + V_{EM0} \frac{\sin(2\pi f(t + dt)) - \sin(2\pi ft)}{2}. \quad (6)$$

Вплив затримки dt на відносну похибку двотактного вимірювання розрахуємо за формулою:

$$\delta(V_{COR}) = \left(\frac{V_{COR}}{V_H} - 1 \right) \cdot 100\% =$$

$$= \frac{V_{EM0}}{V_H} \frac{\sin(2\pi f(t + dt)) - \sin(2\pi ft)}{2} \cdot 100\% =$$

$$= \frac{V_{EM0}}{V_H} K_{ER} \cdot 100\%, \quad (7)$$

де $K_{ER} = \frac{\sin(2\pi f(t + dt)) - \sin(2\pi ft)}{2}$ – часова компонента похибки.

Зокрема, при $t=0$ отримуємо

$$K_{ER0} = K_{ER}(t=0) = \frac{\sin(2\pi fdt)}{2}.$$

Далі, прийнявши, що при $a \rightarrow 0$ в першому наближенні функція синуса може бути представлена її аргументом $\sin(a) \approx a$, отримуємо

$$K_{ER0} \approx \pi fdt \quad (\text{при } \pi fdt < 0.1).$$

Таким чином, в першому наближенні для частоти $f = 50$ Гц отримуємо коефіцієнт часової компоненти похибки $K_{ER0} \approx 157dt$.

Метою даної роботи є подальший розвиток та дослідження ефективності методів придушення електромагнітних завад в пристроях вимірювання магнітного поля на основі холлівських сенсорів.

В цій роботі вперше показана можливість суттєвого підвищення співвідношення сигнал-шум в енергоефективних імпульсних пристроях вимірювання магнітного поля шляхом тритактного сигнального перетворення.

3. Алгоритм мультитактного сигнального перетворення

Запропонований нами алгоритм базується на усередненні сигналів декількох, зокрема трьох послідовних вимірювань в тактах $t+dt$, t , $t-dt$. В тактах $t+dt$ та $t-dt$ струми холлівського сенсора є однаковими як за абсолютними значеннями, так і за напрямком, в такті t – таким же за абсолютним значенням, проте протилежним за напрямком відносно вищезгаданих тактів $t+dt$ та $t-dt$.

Усереднення проводять за формулою:

$$V_{COR} = \frac{V_{I+}(t + dt) + V_{I+}(t - dt) - 2V_{I-}(t)}{4}. \quad (8)$$

Результатом такого вимірювання буде:

$$V_{COR} = \frac{V_H + V_{EM0} \sin(2\pi f(t + dt)) + V_H + V_{EM0} \sin(2\pi f(t - dt)) + 2V_H - 2V_{EM0} \sin(2\pi ft)}{4} = V_H + V_{EM0} K_{ERN}, \quad (9)$$

де $K_{ERN} = \frac{\sin(2\pi f(t + dt)) + \sin(2\pi f(t - dt)) - 2\sin(2\pi ft)}{4}$ – часова компонента похибки.

Враховуючи, що

$$\begin{aligned} \sin(2\pi f(t + dt)) + \sin(2\pi f(t - dt)) &= \\ &= \sin(2\pi ft) \cos(2\pi fdt) + \cos(2\pi ft) \sin(2\pi fdt) + \\ &+ \sin(2\pi ft) \cos(2\pi fdt) - \cos(2\pi ft) \sin(2\pi fdt) = \\ &= 2\sin(2\pi ft) \cos(2\pi fdt). \end{aligned}$$

Отримуємо:

$$K_{ERN} = \frac{2\sin(2\pi ft)\cos(2\pi fdt) - 2\sin(2\pi ft)}{4} = \frac{\sin(2\pi ft)(\cos(2\pi fdt) - 1)}{2}. \quad (10)$$

Проведені розрахунки показують, що запропонований алгоритм мультитактного вимірювання у випадку значних електромагнітних завад дозволяє суттєво підвищити співвідношення сигнал-шум, зокрема при $dt = 1$ мс співвідношення між коефіцієнтами $K_{er}/K_{ern} \approx 6$.

Очевидно, що отримані результати є лише теоретичними. На практиці, поряд з електромагнітною завадою, має місце ряд інших факторів, що обумовлюють точність вимірювання сигналу. Це, зокрема, шум аналого-цифрового перетворювача, флікер шум, білий шум тощо.

Для перевірки ефективності тритактного вимірювання та порівняння його з традиційним двотактним вимірюванням нами проведені численні експериментальні дослідження завадостійкості сенсорних пристроїв магнітного поля з імпульсними режимами роботи.

4. Результати експериментального дослідження мультитактного сигнального перетворення

Експериментальні дослідження проводилися з використанням холлівського тонкоплівкового InSb сенсора, магнітна чутливість якого при номінальному струмі живлення $I_H = 10$ мА становила $S = 194$ мВ / Т. Магнітне поле індукцією $B = 0,132$ Т формувалося постійним магнітом, а електромагнітна завада – ввімкненим в енергомережу силовим трансформатором. Вимірювання проводилося з використанням спеціалізованого сигнального перетворювача та програмного забезпечення OSC_HI.

Робочі вікна програмного забезпечення OSC_HI та приклад типових результатів сигнального перетворення наведені на рис. 1.

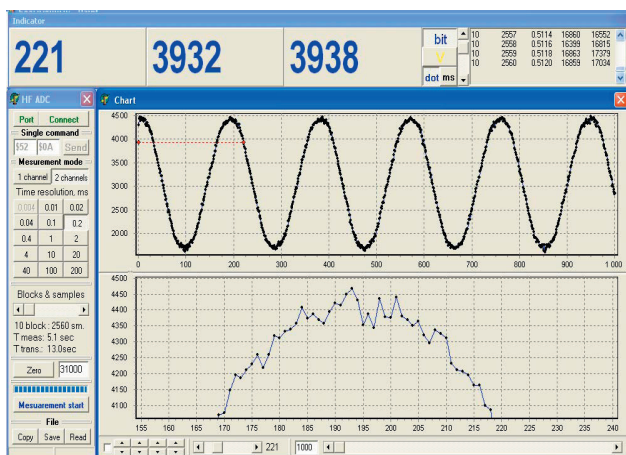


Рис. 1. Робочі вікна програмного забезпечення OSC_HI та приклад типових результатів сигнального перетворення

В ході експериментальних досліджень була поставлена задача аналізу ефективності переходу з двотактного та тритактного вимірювання при дискретному зменшенні струму живлення холлівського сенсора – від номінального $I_H = 10$ мА і до мінімально можливо-го з точки зору подальшого сигнального перетворення $I_H = 0.1$ мА. Метою вказаного зменшення струму живлення холлівського сенсора було, по-перше, забезпечити відповідне зменшення співвідношення сигнал-шум, тобто розширити діапазон дослідження впливу електромагнітної завади, і, по-друге, дослідження можливості зменшення енергоспоживання. При цьому зменшення корисного сигналу (холлівської напруги при заданій величині магнітного поля) при зменшенні струму живлення холлівського сенсора компенсовувалося відповідним збільшенням коефіцієнту підсилення.

У всіх наведених далі даних експериментальних досліджень коефіцієнт підсилення сигналу K_V дискретно змінювався в залежності від струму живлення холлівського сенсора: $K_V \approx 35$ для струму живлення $I_H = 10$ мА; $K_V \approx 350$ – для $I_H = 1$ мА; $K_V \approx 3500$ для $I_H = 0.1$ мА. Таким чином, у всіх режимах вимірювання при фіксованому магнітному полі $B = 0,132$ Т та наборі струмів живлення 10 мА, 1 мА та 0,1 мА (чутливості 194 мВ / Т, 19,4 мВ / Т та 1,94 мВ / Т) різниця вихідних сигналів диференціального підсилювача приблизно становила $V_{AH} \approx 0,88$ В. В режимі двотактного вимірювання затримка між тактами з протилежним напрямком струму холлівського сенсора становила $dt = 0,5$ мс.

Оцінку точності сигнального перетворення проведемо з застосуванням правила “трех сигм” [12], згідно якого при нормальному законі розподілу практично всі можливі вимірювання, а точніше їх 99,7 %, лежать в інтервалі $[m_x - 3\sigma; m_x + 3\sigma]$. Тоді відносну похибку сигнального перетворення δ можна визначити у виді виразу:

$$\delta = \left(\frac{m_x \pm 3\sigma}{m_x} - 1 \right) 100\% = \pm \frac{3\sigma}{m_x} 100\%, \quad (11)$$

де $\sigma = \sqrt{D_x} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2}$ – середньоквадратичне відхилення; $m_x = \sum_{i=1}^n x_i p_i$ – математичне очікування m_x ;

D_x – дисперсія, n – кількість результатів вимірювання в масиві; x_i – i -тий результат вимірювання; p_i – ймовірність виявлення результату вимірювань. Оскільки, аналіз проводився за масивами в серії з 100 вимірювань, ймовірність p_i значення x_i визначалася відношенням $p_i = N(x_i)/100$, де $N(x_i)$ – кількість отриманих значень x_i .

Отримані значення відносної похибки сигнального перетворення представлені на рис. 2. Можна бачити, що у всіх проведених експериментах при однократних вимірюваннях (режим Direct) електромагнітна завада обумовила в 3 ÷ 4 рази погіршення відносної точності сигнального перетворення (збільшення його невідтворюваності). При двотактному (Bidirect_2) та тритактному (Bidirect_3) вимірюваннях не залежно від струму живлення, а відтак – амплітуди сигналу, спостерігається стійкий ефект підвищення точності

сигнального перетворення. Таке підвищення точності при відсутності штучно створеної електромагнітної завади обумовлюється придушенням сторонніх завад, що не створюються полем 50 Гц силового трансформатора, та типовим усередненням результатів багатократних вимірювань.

Мінімальний рівень відносної похибки при відсутності електромагнітної завади має місце при струмі $I_H = 10$ мА і знаходиться на рівні: $\delta \approx 0.2$ % в режимі однократного вимірювання (Direct), $\delta \approx 0.08$ % в режимі двократного вимірювання (Bidirect_2) та $\delta \approx 0.03$ % в режимі трикратного вимірювання (Bidirect_3). Здебільшого ці значення відповідають мінімально можливій невідторюваності сигналу на рівні одного-двох квантів аналого-цифрового перетворювача.

При зменшенні струму живлення холлівського сенсора відносна похибка зростає, що обумовлюється збільшеними коефіцієнтами підсилення сигналу, а відтак – збільшенням рівнів шумів на виході підсилювачів.

При наявності штучно створеної електромагнітної завади ефект її придушення в режимі двотактного вимірювання дає підвищення точності в 6...8 раз, а в режимі трикратного вимірювання – до 20 раз. При цьому граничний мінімальний рівень відносної похибки (при $I_H = 10$ мА, режим трикратного вимірювання) становить $\delta \approx 0.04$ %.

Це відповідає мінімально можливій невідторюваності сигналу на рівні одного-двох квантів, а отже свідчить про практично повне придушення електромагнітних завад.

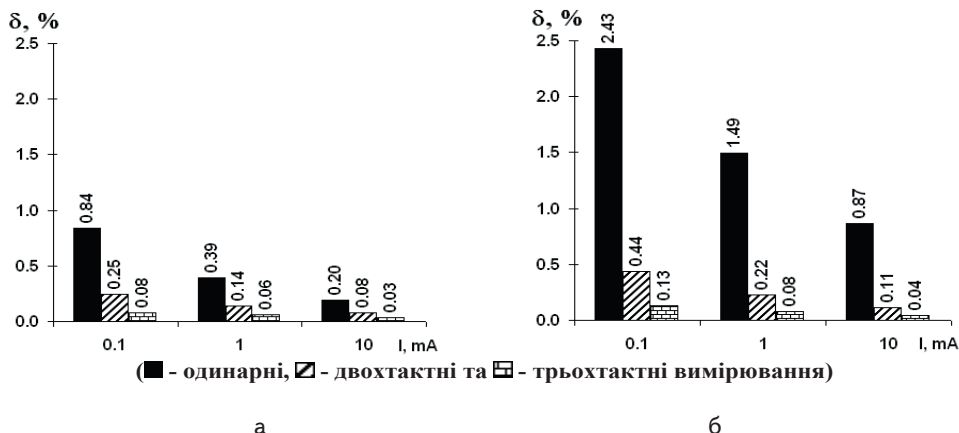


Рис. 2. Залежність відносної похибки сигнального перетворення δ від значення струму I : а – без ЕМ-завади, б – з ЕМ-завадою

Наступним етапом експериментальних досліджень були дослідження залежності відносної похибки сигнального перетворення від затримки між тактами.

Метою таких досліджень було підтвердження вказаного підвищення ефективності придушення електромагнітної завади при переході з режиму двотактного вимірювання у режим трикратного вимірювання.

З метою скорочення об'єму далі наводяться дані лише при дії ЕМ-завади та при одному значенні струму живлення холлівського сенсора - $I_H = 1$ мА. Ці дані наведені на рис. 3.

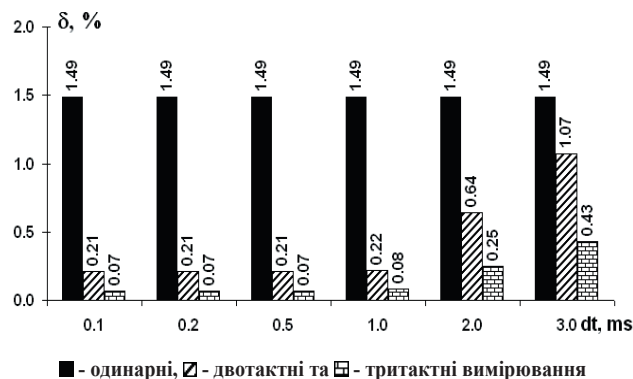


Рис. 3. Залежність відносної похибки сигнального перетворення від зміни затримки між тактами dt ($I_H = 1$ мА з ЕМ-завадою)

Залежність співвідношення між відносними похибками одинарних (Direct) та двотактних (Bidirect_2) вимірювань $K_{\text{direct}} / \text{bidirect_2}$, а також одинарних (Direct) та трикратних (Bidirect_3) вимірювань $K_{\text{direct}} / \text{bidirect_3}$, від часової затримки dt наведена на рис. 4.

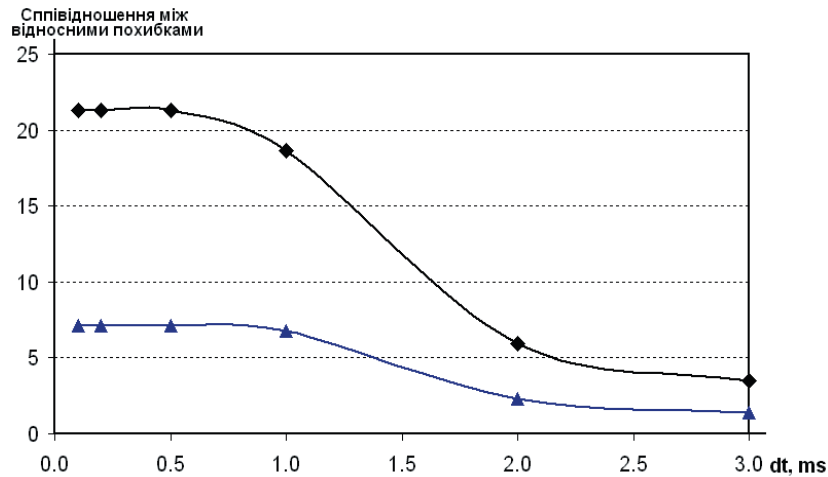
Очевидно, що при однократних вимірюваннях в режимі Direct похибка сигнального перетворення не залежить від dt . Зокрема, в наведеному експерименті для режимі Direct ця похибка становить $\delta = 1.49$ %. Результати даних експериментальних досліджень показують, що при значних затримках між вимірюваннями $dt > 3$ мс ефективність двотактного вимірювання є незадовільною - $\delta = 1.07$ %, тоді як трикратний режим забезпечує зменшення похибки до $\delta = 0.43$ %.

При зменшенні затримки dt між тактами має місце зростання ефективності, як двотактного (Bidirect_2) так і трикратного (Bidirect_3) вимірювань, причому, ефективність трикратного вимірювання в приблизно втричі вища ніж в двотактному вимірюванні. Співвідношення відносних похибок між режимом одинарних (Direct) та двотактних (Bidirect_2) вимірювань досягає максимуму $K_{\text{Direct}} / \text{Bidirect_2} \approx 7$ при $dt < 1$ мс, натомість це ж співвідно-

шення між режимом одинарних (Direct) та трикратних (Bidirect_3) вимірювань досягає максимуму $K_{\text{Direct}} / \text{Bidirect_3} \approx 21$ при $dt < 0.5$ мс.

Ми припускаємо, що відсутність зростання ефективності двотактного та трикратного вимірювань при подальшому зменшенні dt обумовлено граничними можливостями схеми сигнального перетворювача та його елементної бази. При цьому домінуючими факторами, що обмежують теоретично передбачене зростання ефективності двотактного та трикратного вимірювань є високочастотні шуми операційних підсилювачів, час та стабільність встановлення імпульсу вихідної напруги сигнального підсилювача, обмежена

роздільна здатність аналого-цифрових перетворювачів. Зокрема, відносна похибка $\delta = 0.07\%$ в тритактному вимірюванні при $dt < 0.5$ мс лише вдвічі більша за гранично можливий рівень, що досягається при відсутності електромагнітної завади і знаходиться в межах двох квантів вихідного коду аналого-цифрового перетворювача.



співвідношення: ▲ - одинарні/двотактні, ◆ - одинарні/тритактні вимірювання

Рис. 4. Залежність співвідношення між відносними похибками від dt

Таким чином, в проведених нами експериментальних дослідженнях показано, що ефективність тритактного вимірювання в середньому втричі вища ніж в двотактному вимірюванні.

Враховуючи, що співвідношення між кількістю вимірювань, а відтак співвідношення усередненого за певний період енергоспоживання між тритактним та двотактним вимірюваннями становить $3/2 = 1.5$, можна зробити важливий висновок – в порівнянні з тра-

диційним двотактним вимірюванням запропонований алгоритм тритактного вимірювання забезпечує вдвічі вищий інтегрований показник ефективності КЕФ сигнального перетворювача. Цей показник доцільно виразити через відношення завадостійкості до енергоспоживання. В розглянутому сигнальному перетворювачі з режимом тритактного вимірювання завадостійкість

зростає в 3 рази, а енергоспоживання в 1,5 разів, що відповідає підвищенню показника ефективності в 2 рази ($K_{EF} = 3 / 1,5 = 2$).

5. Висновки

Розглянута проблема впливу електромагнітної завади на відтвореність вимірювання сигналу в холлівських сенсорних пристроях. Запропоновано та досліджено ефективність компенсації електромагнітної завади, а відтак підвищення співвідношення сигнал-шум, що забезпечується мультитактним вимірюванням сигналу при протилежних напрямках імпульсів струму живлення холлівських сенсорів.

Показано, що ефективність тритактного вимірювання в середньому втричі вища ніж в двотактному вимірюванні. Введено поняття інтегрованого показника ефективності K_{EF} сигнального перетворювача, що виражається через відношення завадостійкості до енергоспоживання. В розглянутому сигнальному перетворювачі з режимом тритактного вимірювання завадостійкість зростає в 3 рази, а енергоспоживання в 1,5 разів, що відповідає підвищенню показника ефективності в 2 рази ($K_{EF} = 3 / 1,5 = 2$).

Література

1. Spinelli, E. M. Two-Electrode Biopotential Measurements: Power Line Interference Analysis [Text] / E. M. Spinelli, M. A. Mayosky // IEEE Transactions on biomedical engineering. – 2005. – Vol. 52, No. 8. – pp. 1436-1442.
2. Fernandez Chimeno, M. A Comprehensive Model for Power Line Interference in Biopotential Measurements [Text] / M. Fernandez Chimeno, R. Pallás-Areny // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – 2000. – Vol. 49, No. 3. – pp. 535-540.
3. Akinori Ueno. Capacitive Sensing of Electrocardiographic Potential Through Cloth From the Dorsal Surface of the Body in a Supine Position: A Preliminary Study [Text] / Akinori Ueno, Yasunao Akabane, Tsuyoshi Kato, Hiroshi Hoshino, Sachiyo Kataoka, Yoji Ishiyama // IEEE Transactions on biomedical engineering. – 2007. – Vol. 54, N. 4. – P. 759-766.
4. Hotra, Z. Signal transducers of capacitive microelectronic sensors [Text] / Z. Hotra, R. Holyaka, T. Marusenкова, J. Potencki // Elektronika. Poland. – 2010. – № 8. – P.129-132.
5. Lenz, J. Edelstein. Magnetic Sensors and Their Applications [Text] / J. Lenz, S. Alan // IEEE Sensors journal. – 2006. – Vol. 6, No.3. – P. 631-649.
6. Popovic, D. R. Three-Axis Teslameter With Integrated Hall Probe [Text] / D. R. Popovic, S. Dimitrijevic, M. Blagojevic, P. Kejik, E. Schurig, R. S. Popovic // IEEE Transactions on instrumentation and measurement. – 2007. – Vol. 56, N. 4. – P. 1396-1402.
7. Jason A. Fuemmeler, Venugopal V. Veeravalli. Energy Efficient Multi-Object Tracking in Sensor Networks [Text] / A. Jason // IEEE Transactions on signal processing. – 2010. – Vol. 58, No. 7. – P. 3742-3750.
8. Sifuentes, E. Wireless Magnetic Sensor Node for Vehicle Detection With Optical Wake-Up [Text] / E. Sifuentes, O. Casas, R. Pallas-Areny // IEEE Sensors journal. – 2011. – Vol. 11, No. 8. – P. 1669-1676.
9. Bolshakova, I. High precision mapper for cyclotron magnet [Text] / I. Bolshakova, R. Holyaka, V. Erashok, M. Kumada // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2004. – Vol.14, No2. – P. 1818-1821.

10. Bolshakova, I. Magnetic Measuring Instrumentation with Radiation-Resistant Hall Sensors for Fusion Reactors: Experience of Testing at JET [Text] / I. Bolshakova, A. Quercia, V. Coccoresse, A. Murari, R. Holyaka, I. Duran, L. Viererbl, R. Konopleva, V. Yera-shok // JET Preprints and Reports. – 2012. – EFDA-JET-PR(11)54. Available at: \www/ URL: <http://www.iop.org/Jet/fulltext/EFDP11054.pdf>.
11. Bolshakova, I. Ways of providing radiation resistance of magnetic field semiconductor sensors [Text] / I. Bolshakova, S. Krukovskii, R. Holyaka, A. Matkovskii, A. Moroz // Radiation Physics and Chemistry. – 2001. – Vol.61. – P. 743-745.
12. Ghahramani Saeed. Fundamentals of Probability[Text] / Ghahramani Saeed. – 2nd Edition. – Prentice Hall: New Jersey, 2000. – 438 p.

Роботу присвячено дослідженню статистичних характеристик складних мереж на прикладі WWW-простору. Описано методику дослідження за допомогою написаного програмного забезпечення для збирання статистичної інформації веб-сторінок. Досліджено сегменти net.ua, edu.ua українського та сегмент as.il – ізраїльського веб-простору. Доведено адекватність методики та отриманих результатів. Зроблено порівняння отриманих результатів з літературними даними

Ключові слова: статистичні характеристики, ступінь вузла, коефіцієнт кластерності, вхідні зв'язки, вихідні зв'язки

Работа посвящена исследованию статистических характеристик сложных (комплексных) сетей, на примере WWW-пространства. Описана методика исследования сетей с помощью разработанного программного обеспечения для сбора статистической информации веб-страниц. Исследованы сегменты net.ua, edu.ua украинского и сегмент as.il – израильского веб-пространства. Доказана адекватность методики и полученных результатов. Проведено сравнение полученных результатов с литературными источниками

Ключевые слова: статистические характеристики, степень узла, коэффициент кластерности, входящие связи, исходящие связи

УДК 004.42; 004.942

СТАТИСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕЯКИХ ЗОН ІНТЕРНЕТУ ТА ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ

О. Л. Кириченко

Завідувач лабораторією

Кафедра математичних проблем управління
і кібернетики*

E-mail: kirall@rambler.ru

С. Е. Остапов

Доктор фізико-математичних наук, професор

Кафедра програмного забезпечення
комп'ютерних систем*

E-mail: sergey.ostapov@gmail.com

*Чернівецький національний університет

ім. Юрія Федьковича

вул. Коцюбинського, 2, м. Чернівці, Україна, 58012

І. Я. Кановський

Кандидат фізико-математичних наук, професор

Академічний коледж ім. Макса Штерна

Ємек Єзреель, Ізраїль

E-mail: igorkan@gmail.com

1. Вступ

Всесвітня мережа Інтернет вже давно стала не тільки сховищем інформації, способом комунікації, але й об'єктом досліджень. Дослідники з усього світу вивчають статистичні властивості Інтернет загалом, його найбільших доменів та зон. Вивчаються статистичні характеристики зв'язків між людьми в соціальних структурах; розподіл посилань в наукових публікаціях; статистика розповсюдження інфекційних захворювань; зв'язок між словами в літературних творах, зв'язки між абонентами в телекомунікаційних мережах; розподіл посилань на веб-сторінках всесвітньої мережі Інтернет тощо [1 – 5]. WWW-простір описують у вигляді графа, вузлами якого є веб-сторінки, а ребра-

ми – зв'язки між ними. Всесвітня мережа підкоряється статистичним законам комплексних мереж, причому встановлено, що розподіл вузлів графу, який відображає всесвітню павутину, підкоряється степеневому закону з показником, близьким до $(-2,1)$ для вхідних зв'язків та $(-2,7)$ – для вихідних [3 – 9]. Це свідчить про безмасштабність такої мережі, тобто про високий ступінь розвиненості мережі в цілому [1, 3].

2. Аналіз літературних джерел та постановка проблеми

Дослідження статистичних характеристик веб-простору в цілому проведені в статті А. Broder [10], де показано, що WWW-простір являє собою безмас-